

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě: 20.5.2010

.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2010


.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Aleš Pazdera

Adresa trvalého pobytu autora práce: Handkeho 755/1b, Olomouc 799 00

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PAZDERA, A. *Návrh na snížení deformací při svařování dílce leteckého motoru: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technické univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 42 s. Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Bakalářská práce se zabývá problémem vzniku deformací při svařování dílce. V úvodu je popsána celková oprava dílce, stávající technologie svařování a vznikající deformace. Na základě doporučené literatury, zkušeností a dostupných technologií je vybrána metoda svařování. Navržená technologie je odzkoušena na vzorcích a vyhodnocena v laboratoři. Na základě vyhovujících vzorků je provedena certifikace svaru a zaimplementování do postupu opravy dílce. Na závěr je provedeno porovnání obou metod z technického i ekonomického hlediska.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PAZDERA, A. *Reduction of deformation in process of welding of Aircraft engine part: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2010, 42 p. Thesis head: Hlavatý, I.

Bachelor thesis deals with issue of deformation generation in process of part welding. There is description of whole part repair process at the beginning, current welding technology and appearing deformation. Based on recommended letters, skills and available technology is chosen the welding method. Drafted technology is tested on test samples and evaluated in laboratory. Based on conforming test samples is performed the certification of weld joints and implemented to shop routing. At the end is described the evaluation of both methods from technical and economical point of view.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
1 STUDIUM SOUČASNÉHO STAVU OPRAV DÍLCE LETECKÉHO MOTORU	9
1.1 Svařování metodou TIG	12
1.2 Svařované materiály dílce	14
2 NÁVRH TECHNOLOGIÍ SVAŘOVÁNÍ SNIŽUJÍCÍCH DEFORMACE PŘI SVAŘOVÁNÍ DÍLCE.....	17
2.1 Princip svařování elektronovým paprskem	17
2.2 Vliv parametrů svařování na tvar natavené oblasti	18
3 ZHOTOVENÍ A VYHODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ.....	20
3.1 Příprava a svařování zkušebního vzorku	20
3.1.1 Výroba přípravku	20
3.1.2 Popis zařízení EBW 1001/6-60 CNC.....	21
3.1.3 Postup při svařování vzorku:.....	23
3.1.4 Příprava povrchu před svařováním	23
3.1.5 Ustavení dílce do přípravku a na svařovací zařízení.....	23
3.1.6 Parametry svařování	24
3.2 Vyhodnocení vzorků.....	27
Požadované kontroly svarového spoje	28
3.2.1 Vizuální kontrola.....	28
3.2.2 Fluorescenční kapilární kontrola.....	29
3.2.3 Metalografická kontrola	29
4 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH METOD SVAŘOVÁNÍ Z HLEDISKA DEFORMACÍ DÍLCE LETECKÉHO MOTORU	38
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	41
SEZNAM PŘÍLOH	42

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

HRC	Tvrдост dle Rockwella	[-]
I	Svařovací proud	[A]
R _m	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
U	Urychlovací napětí	[V]
BAFFLE RING	Část dílce usměřující proud vzduchu do spalovací části motoru	
HOUSING	Svařovaný dílec	
APU	Auxiliary Power Unit (pomocná pohonná jednotka)	
ORI	Overhaul/Repair Instruction (dokumentace pro opravu)	
GTAW (141)	Gas Tungsten Arc Welding (americké označení pro TIG svařování)	
Class B	Třída svaru	
TIG (141)	Tungsten Inert Gas (svařování v inertním plynu)	
WIG (141)	Wolfram Inert Gas (svařování v inertním plynu)	
AWS	American Welding Society (americká společnost pro svařování)	
AMS	Aerospace Material Specification (materiálová norma v letectví)	
NDT	Non-destructive Testing (nedestruktivní testování)	
FIP	Final Inspection Plan (formulář pro konečnou kontrolu)	
Level III	Citlivost penetrační zkoušky	
ASTM	American Specification for Testing of Material (americká norma pro zkoušení materiálu)	
MET	Interní předpis fy. Honeywell pro práci v metalografické laboratoři	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
EBW (511)	Electron-Beam Welding (svařování elektronovým paprskem)	
SiC	Brusivo s obsahem křemíku	
H ₂ N ₂ O ₄	Kyselina šřavelová – leptadlo	
TAT	Turn-around time (průběžná doba opravy)	
Gate	Část procesu opravy	
ASM	American Society for Metals (americká společnost pro materiály)	
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)	
CNC	Computer numerical control (počítačově řízený systém)	

ÚVOD

Výroba a opravy dílců leteckých motorů je odvětví, ve kterém se spojují vyspělé technologie, nekonvenční materiály, kvalita a přesnost výroby. Zodpovědnost, která je kladena na firmy v tomto odvětví, je nemalá s ohledem na bezpečnost v leteckém provozu a proto je kontrolována úřady pro letectví po celém světě.

Výroba i opravy dílců leteckých motorů mají každý svá specifika v dokumentaci. Výroba nových dílců se v drtivé většině řídí dle výkresové dokumentace, kdežto opravy se řídí dle dokumentace pro opravy, např. inspekční a opravné manuály, servisní příručky a jiná speciální dokumentace, kde je přesně popsáno, co se má kontrolovat a jak opravovat.

Tato bakalářská práce se zabývá problémem deformací při svařování dílce v průběhu jeho opravy. Dílec je určen k vedení proudu stlačeného vzduchu do spalovací komory při současném zajištění odpovídajícího tlaku ve spalovací části motoru.

Dílec je vyroben z několika částí, z nichž dvě hlavní části jsou spojeny svařem. Tyto části jsou vyrobeny z podobných materiálů – niklových slitin Inconel 625 a Inconel 718. Svařuje se metodou TIG (141) v ochranné atmosféře argonu s přídavným drátem Inconel 625 s parametry dle technologického postupu a normy svařování. Právě při svařování těchto dvou částí dochází k deformaci, díky níž dílec po svařování neodpovídá dokumentaci a rozměrovým požadavkům kvality.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol, kde v první části je popsán postup opravy dílce, metoda svařování a svařované materiály, jejich chemické a fyzikální vlastnosti.

Druhá kapitola popisuje navrženou technologii svařování.

Třetí kapitola se zabývá zhotovením vzorků včetně vyhodnocení výsledků.

V poslední kapitole je popsáno technicko-ekonomické zhodnocení navržené technologie (snížení deformací, zkrácení doby opravy, atd.).

V závěru jsou shrnuty všechny dosažené poznatky.

1 STUDIUM SOUČASNÉHO STAVU OPRAV DÍLCE LETECKÉHO MOTORU

Svařování, při němž vznikají deformace, je součástí sekvence operací na výměnu baffle ringu (kroužku), jehož funkcí je usměrnění proudu vzduchu, což zahrnuje operace: odstranění baffle ring, odmašťování, fluorescenční kontrola, sestavení nového baffle ring, stehování, svařování, začištění, odmašťování, fluorescenční kontrola, rovnání, obrábění, celkové začištění a rozměrová kontrola. Baffle ring se vyměňuje z důvodu trhlin v původním svaru, kde pokud jsou trhliny delší než 100 mm, je požadavek ho vyměnit. Příklad trhliny je na obr. 1.

V současné době je navržen postup opravy tak, aby odpovídal dokumentaci pro opravu a technologické posloupnosti opravy, ve dvou etapách:

Analýza - hodnotí opravitelnost dílce, jehož součástí je očištění dílce, fluorescenční kontrola, vizuální a rozměrová kontrola.

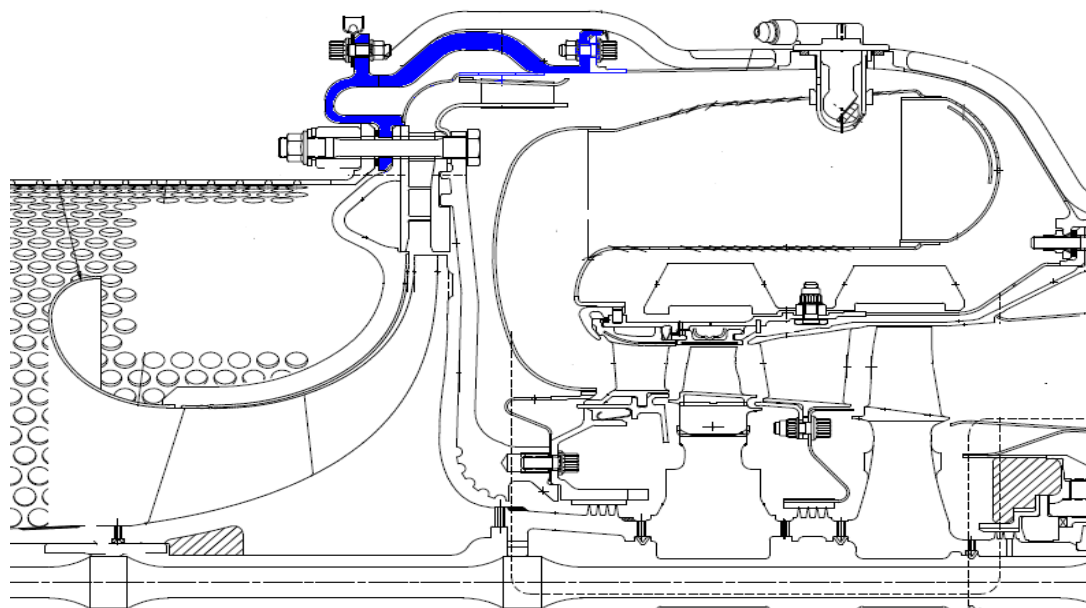
Oprava – je samotná oprava dílce, součástí jsou sekvence operací jako svařování vad, výměna baffle ring, oprava otvoru na kolík a výměna kolíku, rozměrová oprava ploch plazmatickým žárovým nástřikem a rovnání dílce.



Obr. 1 Trhlina ve svaru dílce

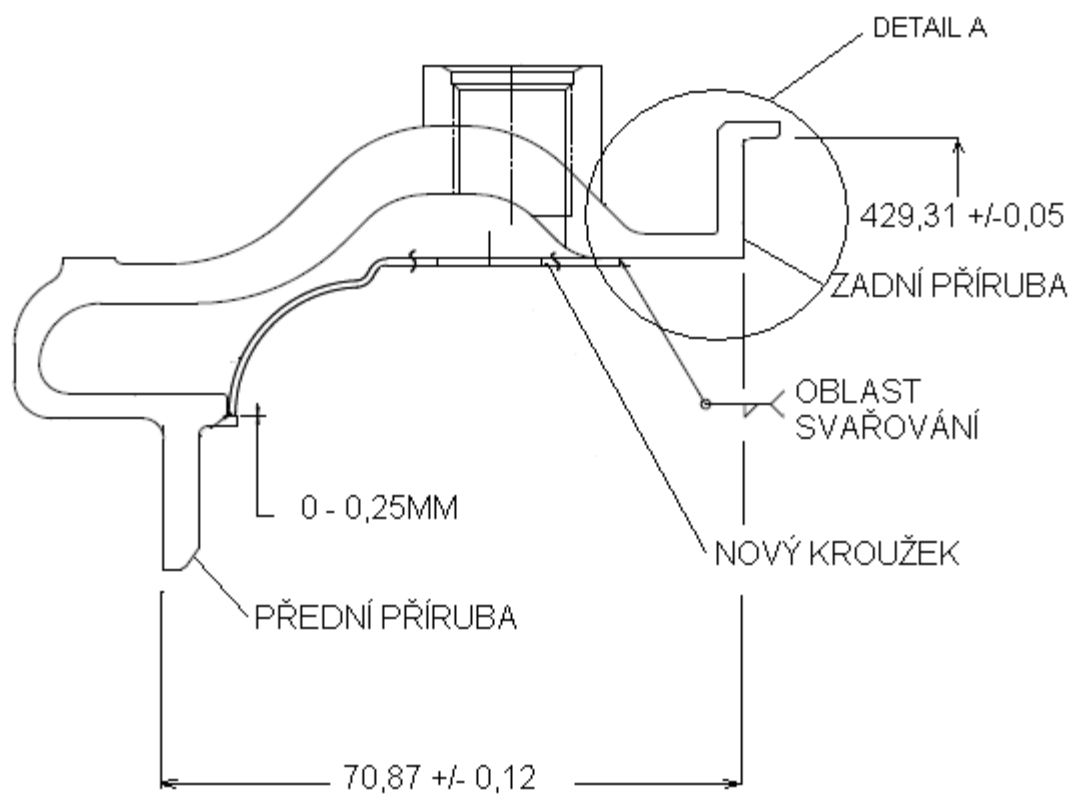
Během této operace dochází k deformaci dílce, která je nežádoucí z hlediska rozměrů dílce a na to navazující špatná funkce dílce v motoru, a v nemalé míře také smontovatelnost

dílce s ostatními částmi motoru - obr. 2. Tato sekvence se provádí na 100% opravovaných dílců.

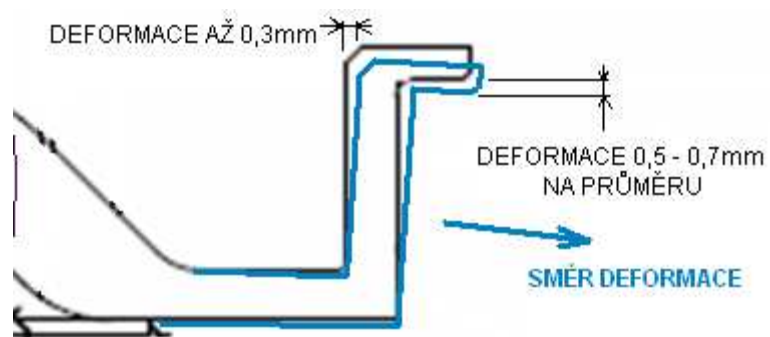


Obr. 2 APU 131-9D – umístění dílce v motoru [8]

Deformace a ovlivněné rozměry vznikající při svařování jsou ukázány na obrázku č. 4. V důsledku blízkosti místa svařování je ovlivněna zadní příruba a rozměry s ní spojené – průměr 429,31 mm a výška dílce (klíčová charakteristika) 70,87 mm - obr. 3. Poté se dílec opravuje soustružením a plazmatickým žárovým nástřikem, přičemž dochází k zeslabování základního materiálu a k nežádoucímu snížení životnosti dílce. Životnost dílce se odvíjí od počtu provozních hodin v motoru a počtu servisních oprav.



Obr. 3 Průřez dílcem [8]

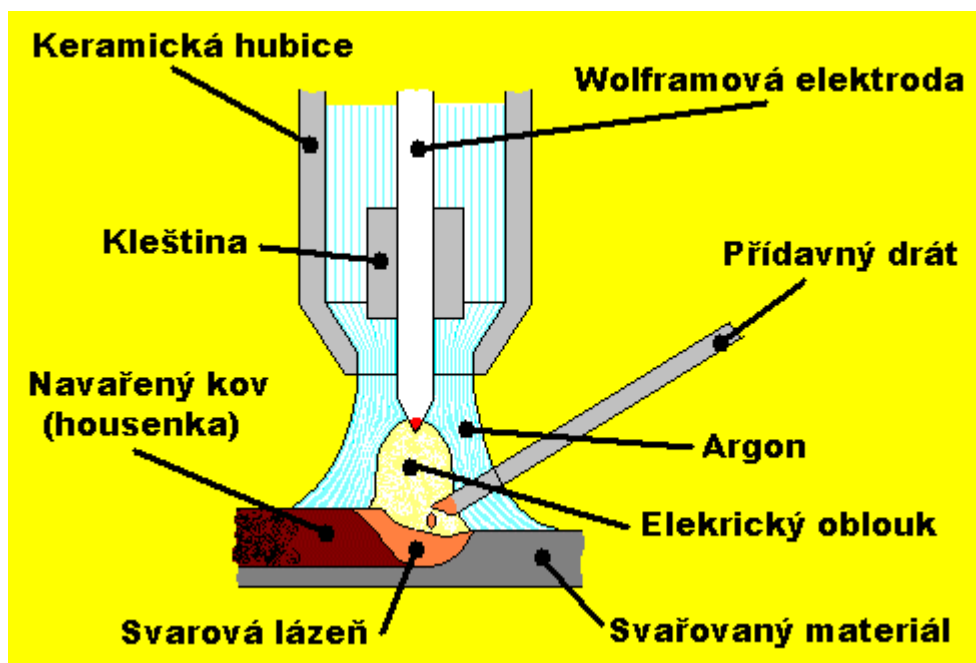


Obr. 4 Detail A – směr deformace dílce

1.1 Svařování metodou TIG - 141

Požadavek na svařování kroužku je popsán opravárenskou dokumentací ORI P31301 revize A, podle které má být svařování provedeno metodou GTAW, což je americké označení metody TIG popř. WIG, dle normy AWS D17.1, Class B s použitím přídatného materiálu Inconel 625 dle normy AMS5837.

Metoda TIG je svařování v ochranné atmosféře inertních plynů netavící se elektrodou - obr. 5. Tato metoda se používá ke svařování hliníkových slitin, mědi, vysokolegovaných ocelí a superslitin pro nejnáročnější svary především v letecké technice. Svarová lázeň je chráněna ochrannou inertní atmosférou argonu před nepříznivými vlivy okolí (kyslík, dusík). Argon nevstupuje do chemických reakcí se svarovou lázní. Je přiváděn do místa svaru keramickou hubicí kolem wolframové elektrody. Elektroda se používá wolframová, jelikož musí odolávat vysoké teplotě při svařování, kdy se ohřívá na teplotu 3000 – 3500°C. Oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem [1].



Obr. 5 Princip svařování metodou TIG [9]

Svařování může být prováděno buď pouze natavením základních materiálů nebo s přidáním přídatného materiálu podobného složení jako svařované základní materiály.

Svařování metodou TIG je možno provádět ručně, ale také na poloautomatech a automatech, kde je přídavný drát přiváděn podavačem zboku a hubice upevněná v držáku. Stroj pracuje na základě programu vytvořeného svařovacím technologem - programátorem.

Výhody svařování metodou TIG:

- výborná kontrola nad svarovou lázní z toho důvodu, že přídavný drát se přidává dle potřeby
- možnost svařovat zcela bez přídavného drátu, kde je potom zajištěna 100% shoda svarového kovu se základním materiálem, což je z metalurgického hlediska výhodné
- vysoká teplota oblouku, kdy je proto možno svařovat superslitiny
- výborná ochrana svarové lázně

Nevýhody svařování metodou TIG:

- vysoká technická náročnost na svařovací zařízení (zejména pro svařování střídavým proudem hliníkových slitin)
- malá produktivita zejména při ručním svařování, proto se nehodí na velkosériovou výrobu, ale především na svařování tvarově složitějších konstrukcí z ušlechtilých materiálů

Parametry svařování metodou TIG se liší dle svařovaných materiálů a jejich tloušťky. Pro svařování kroužku se používá toto nastavení svařovacího zařízení a pokyny k provedení operace:

Svařování TIG	předpis: AWS D17.1, Class B
Druh a poloha svaru:	PA
Svařovací zařízení:	ruční svařovací souprava
Základní materiál:	baffle ring - INCO 718 + housing - INCO 625
Přídavný materiál:	Inconel 625; AMS 5837

PŘÍPRAVA PŘED SVAŘOVÁNÍM:

Materiál musí být před svařováním kovově lesklý.

Místo před svařováním odmastit rozpouštědlem (acetone).

PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ:

=====

Elektroda:	WL 15 \varnothing 1,6 mm
Velikost hubice:	\varnothing 7 až 12 mm
Druh proudu:	DC
Průtok argonu	- hořák: 8 \pm 2 l/min (plyn Ar) - podfuk: 7 \pm 2 l/min (plyn Ar)
Svařovací proud:	40 A \pm 5 A

POKYNY PRO PROVEDENÍ OPERACE

=====

1. Svařit dílec s kroužkem dle nákresu.
2. Svar zkontrolovat vizuálně dle NDT -05, kritéria hodnocení dle AWS D17.1.
3. Zkontrolovat mezeru u vnitřním průměru "baffle ring" a zapsat ji do FIPu.
Poznámka: Maximální povolená mezera je 0,76 mm (.030")

1.2 Svařované materiály dílce

Dílec se skládá ze dvou hlavních částí – baffle ring a housing. Oba díly jsou vyrobeny z niklových slitin podobného chemického složení.

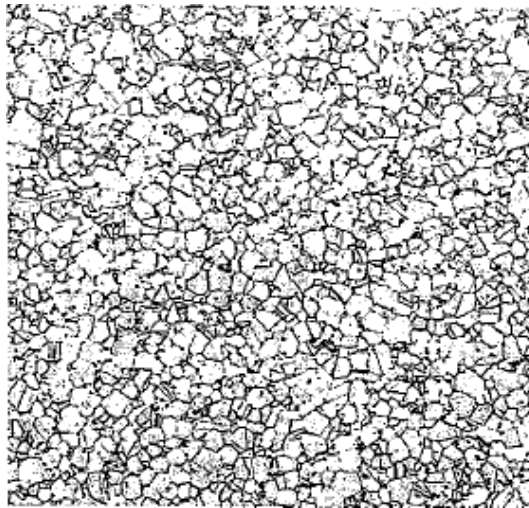
Baffle ring je vyroben z materiálu Inconel 718 dle normy AMS 5596 z žárovevné nikl-chromové slitiny, kde chrom je základním přísadovým prvkem. Struktura je patrná z obr. 6.

Chemické složení dle AMS5596: 52,5Ni–19Cr–3,0Mo–5,1Nb–0,9Ti–0,5Al–18Fe

Mechanické vlastnosti: Rm=1240MPa, HRC=36

Přísadovými prvky jsou hliník a titan, které tvoří hlavní vytvrzující fázi, a prvky karbidotvorné zpevňující niklovou maticí a vytvářející vlastní karbidy. Rozpouštěním

přecházejí přísadové prvky do tuhého roztoku, ochlazením poté vzniká metastabilní tuhý roztok, při jehož stárnutí se vylučují precipitáty a tím je zajištěno vytvrzení materiálu. Vysoká žárovevnost této slitiny je podmíněna přítomností velmi jemných precipitátů fáze γ' rovnoměrně rozdělených v celém objemu slitiny. S objemovým procentem roste žárovevnost slitiny, ale dochází k výraznému zhoršení tvárnosti. Tato žárovevná slitina se používá do teploty max. 950°C při působení mechanických napětí [3].



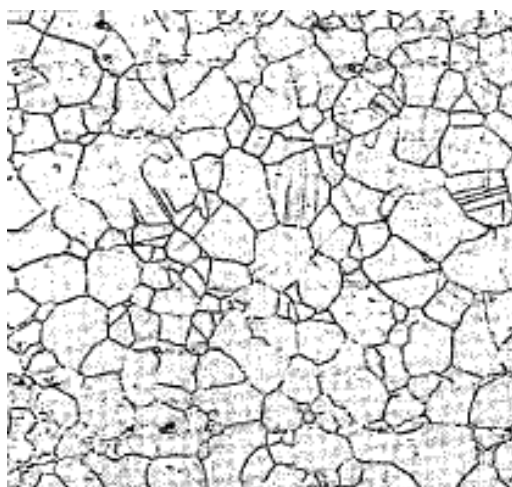
Obr. 6 Struktura Inconel 718 [6]

Housing je vyroben z materiálu Inconel 625 dle normy AMS 5599 z žárovzdrnné nikl-chromové slitiny, kde chrom je základním přísadovým prvkem, podmiňující udržení žárovzdrnnosti. Struktura je patrná z obr. 7.

Chemické složení dle AMS5599: 62Ni–21,5Cr–9,0Mo–3,7Nb–0,4Ti–0,4Al–5Fe

Mechanické vlastnosti: $R_m=827\text{MPa}$

Struktura této slitiny je tvořena tuhým roztokem s plošně středěnou mřížkou, který je zpevněn pouze substitučně. Proto nemůže za vyšších teplot přenášet mechanická zatížení bez nebezpečí rychlosti tečení slitiny. Obsah příměsových prvků tvořící nežádoucí fáze je minimální. Tato žárovzdrnná slitina se používá do teploty max. 1150°C bez mechanického namáhání [3].



Obr. 7 Struktura Inconel 625 [6]

Svařitelnost obou materiálů je dobrá, jelikož mají nízký obsah Ti a Al, které svařitelnost zhoršují. Svařování probíhá u materiálu Inconel 718 v nevytvrzeném stavu. Jelikož obě slitiny mají nižší teplotu tavení, používá se menší příkon na svařování [5].

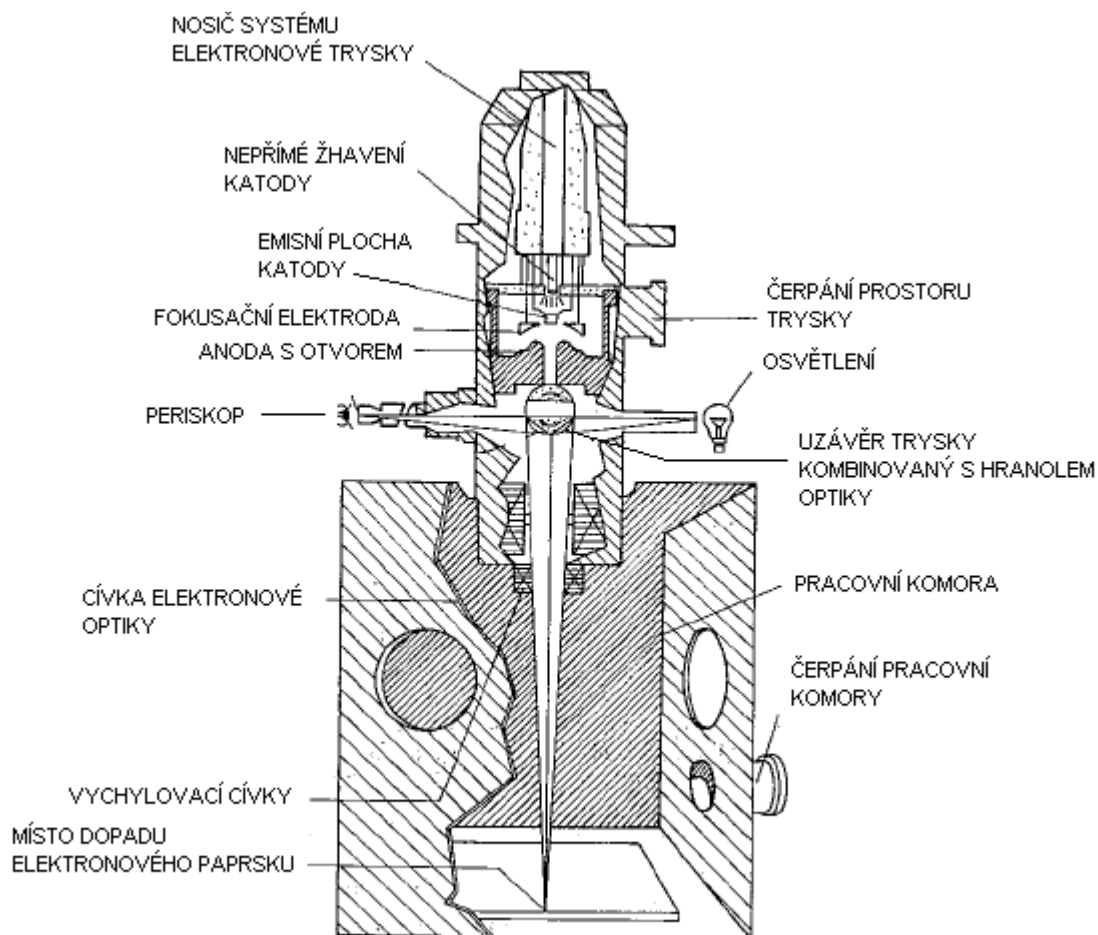
Trhliny jsou nejčastějším typem poruch svarového spoje. Nejčastějším typem trhlin u těchto niklových slitin, jsou trhliny vznikající za horka – tzv. likvační trhliny. Tyto trhliny vznikají na hranicích zrn, kdy některé částice či nečistoty ve slitině (u niklových slitin jsou to nejčastěji sulfidy titanu) se rozpouštějí při svařování. V první fázi chladnutí, kdy začíná působit tahové napětí, se zrna separují a vznikají mezikrystalické trhliny, které potom přecházejí do svarového kovu. Likvační trhliny jsou podporované zhrubnutím zrn v tepelně ovlivněné oblasti [5].

2 NÁVRH TECHNOLOGIÍ SVAŘOVÁNÍ SNIŽUJÍCÍCH DEFORMACE PŘI SVAŘOVÁNÍ DÍLCE

Z hlediska dostupných technologií a účelu (snížení deformací) bylo navrženo použití zařízení pro svařování elektronovým paprskem (číslo metody 511), kterým firma Honeywell disponuje.

2.1 Princip svařování elektronovým paprskem – metoda 511

Při tomto způsobu svařování se používá k ohřevu materiálu tepla získaného přeměnou kinetické energie rychle letících elektronů na energii tepelnou při jejich dopadu na povrch svařovaného materiálu. Svazek elektronů je pomocí elektronové optiky, působením elektrostatických a elektromagnetických polí, vytvářených soustavou clon a magnetických cívek, tzv. fokusačních čoček, soustředěn a urychlen do místa svaru. Schéma zařízení je znázorněno na obr. 8 [2].



Obr. 8 Princip svařování elektronovým paprskem [1]

Kinetickou energii získávají elektrony v elektrickém poli mezi katodou a anodou, na které je přivedeno urychlovací napětí. Elektrony jsou urychlovány vysokým napětím (30 – 150 kW). Urychlené elektrony proletí otvorem anody a jsou znovu soustředěny optikou do místa svařování. Samotný proces svařování probíhá ve vakuu, jelikož na vzduchu by rychlý pohyb elektronů brzdily molekuly vzduchu. Svařovaný předmět je proto umístěn ve vakuové komoře, kde se pracovní prostor čerpá obvykle na tlak $1,33 \cdot 10^{-3}$ Pa. Při dopadu rychle letících elektronů na povrch svařovaného materiálu se celá jejich kinetická energie přemění na tepelnou a to ve velmi úzké zóně a do velké hloubky. Poměr šířka:hloubka je 1:30 a více. Vzniká tak svar s malou šířkou ovlivněného pásma a tím dochází k minimální deformaci způsobené teplotním polem svaru. Teplota v místě svaru dosahuje 5000 – 6000°C a hustota energie až 10^9 W.cm⁻². Při svařování se nepoužívá přídavný materiál. Svár vznikne pouze vzájemným metalurgickým spojením obou materiálů. Svarové plochy pro spoj musí být přesně obrobeny s minimální vůlí, čímž se zaručí kvalitní průřez svaru [1, 2].

2.2 Vliv parametrů svařování na tvar natavené oblasti

Výsledek svařování při svařování svazkem elektronů je výrazně ovlivňován několika parametry. Na tvar svaru má největší vliv [1]:

Urychlovací napětí U – má rozhodující vliv na průměr paprsku, který se s rostoucím napětím při konstantním proudu zmenšuje a to exponenciálně.

Svařovací proud I – s rostoucím svařovacím proudem roste i průměr paprsku a to tím výrazněji, čím je nižší urychlovací napětí. Je však méně výrazné, než vlivem změny urychlovacího napětí, takže v praxi to znamená, že pro zmenšování průměru paprsku je účelnější zvyšovat urychlovací napětí než snižovat svařovací proud.

Zaostřovací napětí – se zvyšujícím se urychlovacím napětím nebo svařovacím proudem je pro udržení konstantního průměru paprsku nutné zvyšovat i zaostřovací napětí, protože se zvyšuje odpudivá síla elektronů a paprsek má snahu zvětšovat svůj průměr.

Fokusace – fokusací paprsku můžeme umístit ohnisko paprsku do libovolné vzdálenosti od svařovaného povrchu.

Výhody svařování svazkem elektronů [1, 2]

- svařování materiálů s vysokou teplotou tavení (Mo, W, Ta,...) a žárovevých slitin typu Inconel
- svařování velmi tlusté stěny na jeden průchod do hloubky až 300 mm a svařování součástí s velmi rozdílnou tloušťkou stěn
- získání svarových spojů s velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí s minimální deformací – velmi úzké svary prakticky se stejnou tloušťkou po celé délce svaru
- svařování bez přídavného materiálu

Nevýhody svařování svazkem elektronů [1, 2]

- vznik zdraví škodlivého rentgenového záření
- vysoká pořizovací cena zařízení
- nutnost dokonalého odstranění remanentního magnetismu slitin železa, který způsobuje vychylování paprsku
- nutnost důkladné přípravy svařovaných ploch obráběním, mezera mezi svařovanými plochami nesmí překročit 0,1 mm
- nutnost dokonalého očištění svarových ploch od tuků, olejů, oxidů a jiných nečistot, protože ve vakuu se můžou rozkládat nebo vypařovat

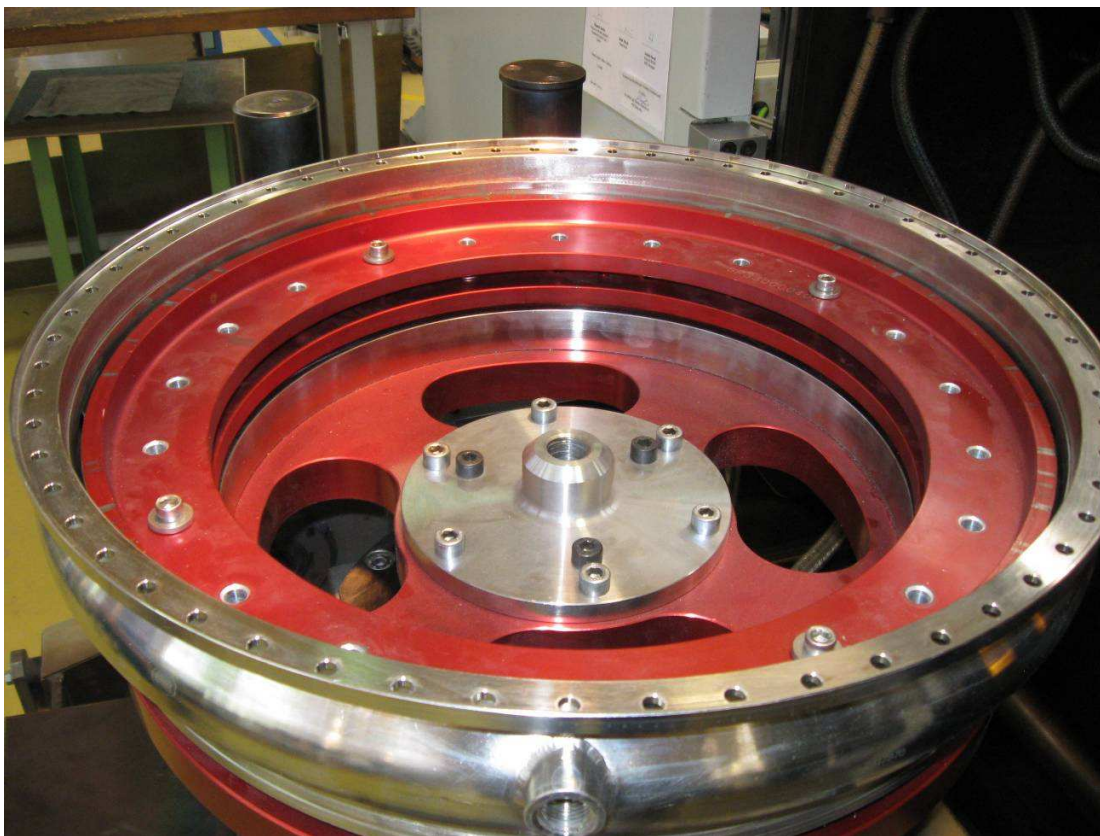
3 ZHOTOVENÍ A VYHODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

3.1 Příprava a svařování zkušební vzorku

Pro účely posouzení svařovaného spoje byl použit dílec 3827429-1, který již nesplňoval podmínky letuschopnosti a proto byl vyřazen z procesu opravy. Pro účel certifikace svaru byl však ze všech hledisek použitelný.

3.1.1 Výroba přípravku

Před samotným svařováním bylo nutno vyrobit svařovací přípravek, do kterého se dílec ustaví a provede se v něm svařování – obr. 9. Zvláštností u svařovacích přípravků je to, že musí být vyrobeny z nemagnetických materiálů včetně všech součástí (šrouby, podložky, kolíky, ...). Přípravek byl proto vyroben z materiálu 17246 a AL5083. Magnetismus materiálu přípravku má vliv na vychylování paprsku elektronů a ovlivňuje tím kvalitu svarového spoje. Samotný přípravek je konstruován pro upnutí na stůl ve svařovacím stroji, k zajištění polohy baffle ringu vůči housingu a k dotlačení svařovaných ploch na minimální svařovací mezeru.



Obr. 9 Dílec v přípravku

3.1.2 Popis zařízení EBW 1001/6-60 CNC

Zařízení firmy Leybold – Heraeus (obr. 10) pro svařování svazkem elektronových paprsků se skládá z následujících částí [8, 10]:

- Elektronové dělo (obr. 11) – maximální urychlovací napětí 60 kV, maximální vzdálenost dílce od děla 600 mm
- Napájení vysokým napětím – do 60 kV a 6 kW výkonu s regulátorem paprskového proudu
- Elektrické zařízení, ovládací panely (obr. 12)
- Vakuová komora s x/y stolem

Vnitřní rozměry komory: délka 1400 mm

šířka 1100 mm

výška 900 mm

obsah cca 1400 dm³

Maximální nosnost 300 kg

Přesnost pohybu 0,1 mm/m

Maximální rychlost stolu – 3000 mm/min

- Vakuovací zařízení pro dělo a komoru

Vakuování děla – turbomolekulární vývěva typu Turbovac 150 s výkonem do 150 l/min, odstředivá vývěva D 8 A s výkonem do 8 m³.hod⁻¹

Vakuování komory – 2 dvoustupňové odstředivé vývěvy DK 200 s výkonem do 200 m³.hod⁻¹, Rootsovo dmychadlo typu RUVAC WAV 1000 s výkonem do 1000 m³.hod⁻¹, olejová difusní pumpa typu DI 12000 s výkonem 12000 l.hod⁻¹

- CNC řízení dráhy typ Siemens 3M-E



Obr. 10 Zařízení EBW 1001/6-60 CNC – vakuová komora, elektronové dělo, ovládací panely



Obr. 11 Elektronové dělo



Obr. 12 Ovládací panely

3.1.3 Postup při svařování vzorku:

1. Odstranění starého baffle ringu soustružením na rozměry pro ustavení a svařování nového baffle ringu.
2. Alkalické odmašťování dílce.
3. Fluorescenční kapilární kontrola dílce před svařováním dle ASTM E 1417, Level III, Metoda D. Trhliny nejsou dovoleny.
4. Příprava před sestavením baffle ringu do housingu.
5. Sestavení baffle ringu s housingem.
6. Svařování elektronovým paprskem dle AMS2680
7. Fluorescenční kapilární kontrola dílce dle ASTM E 1417, Level III, Metoda D. Trhliny nejsou dovoleny.
8. Řezání vzorků pro metalografické zkoušky na drátové řezačce
9. Metalografické vyhodnocení vzorků
10. Vystavení certifikátu postupu svařování

3.1.4 Příprava povrchu před svařováním

Před sestavením byly svařované povrchy zbaveny oxidů, okují, mastnoty, vlhkosti a zbaveny cizích látek. Spojované hrany jsou pravoúhlé a rovnoběžné, hrany nejsou zaoblené a jsou odjehlené. Pro čištění bylo použito rozpouštědlo (aceton) a zaleštění provedeno SiC brusivem. Proces čištění nezpůsobil ztrátu přesnosti sestavení. Samotné svařované povrchy byly očištěny 96% lihem.

3.1.5 Ustavení dílce do přípravku a na svařovací zařízení

Před samotným ustavením byl očištěn i přípravek od mastnoty a dalších nečistot. Základní část přípravku se připevnila na svařovací stůl. Poté byl do něho vložen housing s již ustaveným baffle ring a upnut další částí přípravku. Poslední část – rozpěrka byla vložena jako poslední a tím byl dílec ustaven do přípravku a na svařovací zařízení – obr. 13. Po ustavení do přípravku byla operátorem zkontrolována maximální svařovací mezera 0,05 mm.



Obr. 13 Dílec ustavený v přípravku na svařovacím stole

3.1.6 Parametry svařování

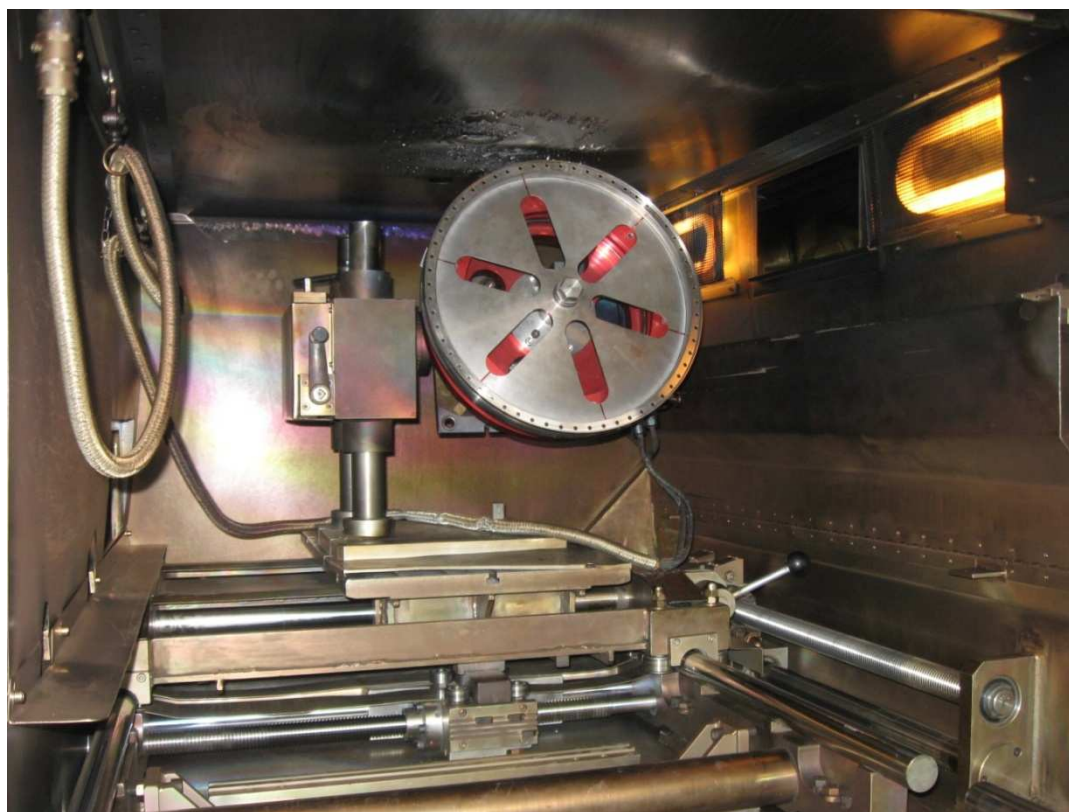
Před svařováním vytvořil svařovací technolog program GO3827429, který obsahuje jak parametry samotného svařování, tak např. ustavení a náklon stolu, vzdálenost děla, atd. – tab. 1.

Tab. 1 Parametry svařování

Nastavení stroje Welder settings	Svařovací průchod Penetration pass
Číslo programu: Program number	GO3827429
Úhel stolu [°]: Desk angle	75
Vzdálenost děla [mm]: Gun-to-work distance (± 3 mm)	430
Urychlovací napětí [kV]: High voltage ($\pm 5\%$)	60
Svařovací proud [mA]: Beam current ($\pm 5\%$)	5,50
Rychlost svař. [mm/s]: Welding speed ($\pm 5\%$)	10

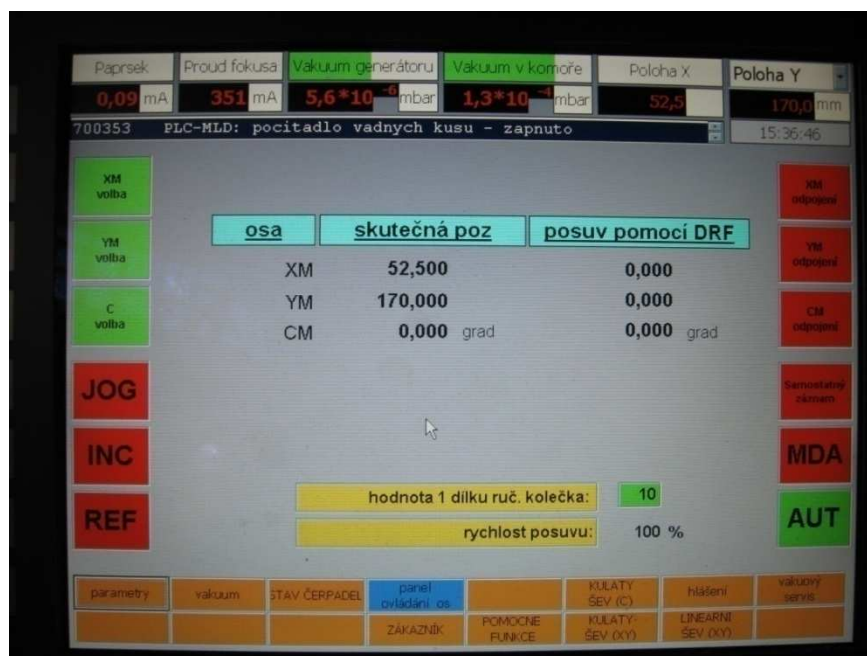
Fokusační proud [mA]: Focus current (± 5%)	448
Žhavicí proud [A]: Filament current (± 5%)	24,8
Náběh proudu [mm]: Current up-slope (± 5%)	15
Doběh proudu [mm]: Current down-slope (± 5%)	15
Frekvence [kHz]: Pulse frequency (± 5%)	1kHz
Typ frekvence: Frequency type	kruh
Amplituda [V]: Amplitude	0,1x1,15

Po zkontrolování gauss-metrem, zda přípravek neobsahuje zbytkový magnetismus (maximálně 5 gaussů), byl poté stůl s přípravkem a dílcem ustaven do vakuové komory do polohy pro svařování dle programu – obr. 14.



Obr. 14 Dílec ustavený v komoře pro svařování

Po uzavření komory a nastavení programu pro svařování se započalo s odčerpáváním vzduchu z komory. Hodnota vakua byla nastavena dle normy AMS 2680 na hodnotu minimálně $1,33 \times 10^{-4}$ mbar – obr. 15.



Obr. 15 Kontrola parametrů na displeji zařízení

Po svařování komora zůstala zavřená po dobu 2 minut a až poté došlo k jejímu zavzdušnění. Poté byl svařený dílec vyjmut ze zařízení a přípravku – obr. 16.



Obr. 16 Dílec po svařování

3.2 Vyhodnocení vzorků

Požadované parametry svarového spoje jsou dány normou [4] a interními předpisy [7]:

Barva svaru a TOO - Povrch svaru musí být stejný jako základního materiálu.

Provaření - Musí být kompletně provařeny, pokud není částečné provaření povoleno. Ve zvláštních případech je neúplné provaření povoleno, pokud je povrch svaru obráběn.

Neúplné protavení - Neúplné protavení plně provařených svarů, nedostatečné provaření, studený nebo chybějící spoj není povolen.

Trhliny - Nejsou povoleny, pokud nejsou výkresem povoleny mikrotrhliny.

Dutiny a póry - Nejsou povoleny, pokud nebudou odstraněny obráběním.

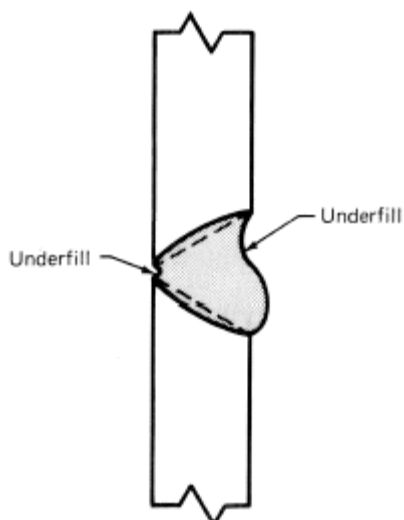
Nezaplněný a konkávní kořen svaru - Celková délka propadnutí svaru na čele a kořenu svaru nesmí překročit tolerance obrábění specifikované výkresem. Povolené propadnutí každého neobráběného povrchu po svařování může být maximálně 10% velikosti svaru nebo dle specifikace na výkresu – obr. 17 a 19.

Podřezání a kořenové zápalý - Pokud jsou povoleny, nesmí překročit tolerance výkresu. Pokud není jinak specifikováno, podřezání nebo kořenové zápalý nesmí překročit 10% tloušťky materiálu, a nesmí mít kořenový radius menší než 1,5 mm – obr. 18.

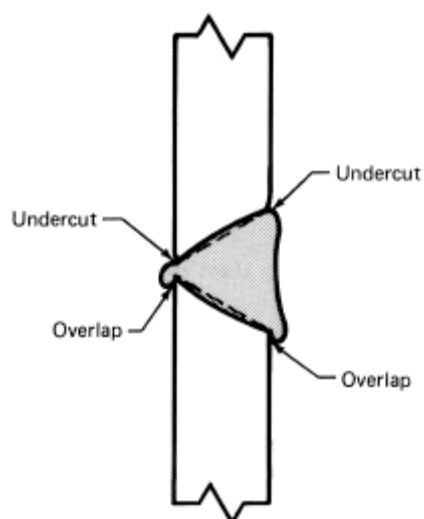
Přesazení - nesmí překročit 10% nominální tloušťky nebo 0,25 mm, vždy menší hodnota

Přeložky – Nepřípustné – obr. 18.

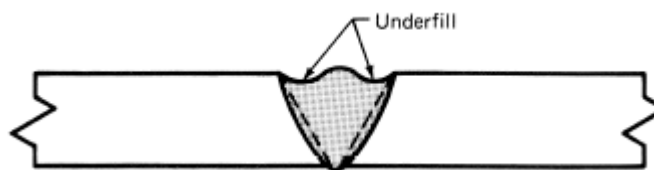
Převýšení - Deformace, většinou v případě tenkých plechů, způsobuje, měřeno z jednoho cípu nebo okraje, zvednutí z roviny nominálního materiálu více než 30% tloušťky základní materiálu, je nepřípustné.



Obr. 17 Nezaplnění čela a kořene svaru [7]



Obr. 18 Podřezání a přeložka svaru [7]



Obr. 19 Nezaplnění svaru [7]

Požadované kontroly svarového spoje

Ke zjištění vlastností provedených svarů bylo použito následujících metod kontroly dle požadavků normy AMS2680 požadované pro svařování tohoto svarového spoje:

- Vizuální kontrola – provedená operátorem ihned po svařování
- Fluorescenční kapilární kontrola – dle ASTM E 1417, Level III, Metoda D
- Metalografická analýza – v certifikované laboratoři dle předpisů MET pro přípravu a vyhodnocování vzorků

3.2.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrolu provedl operátor-svářeč hned po svařování a byl tím sledován hlavní cíl – zjistit ihned případné vady svaru jako nepravidelnost housenky, zápaly a podobně. Provedl ji dle interního předpisu NDT05 odvolávající se na normu svařování AMS2680. Kontrola prokázala, že svar na vzorku je v souladu s požadavky na vizuální kontrolu svaru. Svar byl

čistý, beze stop po oxidaci, pravidelný po celém obvodu – obr. 20. Svár byl vyhodnocen jako **VYHOVUJÍCÍ** – viz příloha 1.



Obr. 20 Detail svaru pro vizuální kontrolu

3.2.2 Fluorescenční kapilární kontrola

Kontrola byla provedena kontrolorem dle normy ASTM E 1417, Level III, Metoda D. Je to nedestruktivní metoda zkoušení materiálu, při které se na dílec nanese vrstva penetrantu po dobu 20 - ti minut, aby se penetrant mohl uchytit v případných vadách svaru, poté se penetrant odstraní pomocí oplachu, ponořením do emulgátoru a znovu oplachu a dá se usušit. Poté se svarový spoj vyhodnocuje pod UV lampou (svítí penetrant uchycený ve vadách spoje) a případné vady se zaznačí na dílci.

Při této kontrole nebyly zjištěny žádné vady svarového spoje, tzn. trhliny či případné necelistvosti svaru. Svar byl vyhodnocen jako **VYHOVUJÍCÍ** – viz příloha 1.

3.2.3 Metalografické posouzení svarového spoje

Cílem metalografického hodnocení bylo zjistit geometrii svaru, hloubku průvaru a případné defekty ve svařovaném spoji jako porezitu, trhliny a neprůvary.

Příprava vzorků

Řezání - Pro účely metalografické analýzy byly vyřezány z dílce na drátové řezačce 2 úseky dílců pro celkem 3 požadované vzorky. Vzorky musely být řezány kolmo na svar – příčný řez. Při jiném úhlu řezání mohlo dojít ke špatnému vyhodnocení vzorku v laboratoři.

Příprava metalografických vzorků - po vyřezání vzorků následovalo jejich zalévání do forem. Při této činnosti se nesmí poškodit povrch pro hodnocení vzorku, nesmí vzniknout mezera mezi povrchem vzorku a hmotou (způsobila by vztlínání leptadla před dokončením hodnocení), musí vzniknout kolmost oblasti pro měření povrchových rozměrů, materiál svorky se musí podobat materiálu vzorku (zabrání to galvanickému působení, které ztěžuje leptání) a svorka musí být o stejné tvrdosti jako vzorek (minimalizace zakulacení hran vzorků během broušení a leštění).

Jako materiál pro zalévání vzorků se použila epoxidová pryskyřice Lecoset 7007 pro její dobré vlastnosti k zalévání vzorků jako vývin tepla, smrštitivost, adhesi ke vzorku a tvrdost.

Po zalití vzorku bylo do formy vloženo číslo vzorku k předepsané sledovatelnosti vzorku – obr. 21. Vzorky musí být uchovávány po dobu 5 - ti let.



Obr. 21 Označení vzorku

Z hlediska složitosti vzorku bylo použito vakuové impregnace vzorku, která zajišťuje zaplnění všech dutin a zabraňuje kontaminaci a vytékání – obr. 22.



Obr. 22 Vakuová impregnace vzorků

Broušení a leštění - po zatuhnutí pryskyřice následovalo broušení a leštění vzorku. Je to nejběžnější metoda přípravy metalografických vzorků pro mikroskopické pozorování struktury. Pro broušení a leštění bylo použito zařízení BUEHLER Power Pro 5000 – obr. 23 a 24 a program U4.



Obr. 23 Zařízení BUEHLER Power Pro 5000



Obr. 24 Držák na vzorky

Broušení sestávalo z hrubého a jemného broušení. Hrubé broušení (zrnitost 180 a hrubší) se použilo k zarovnání nerovného povrchu, odstranění podstatného povrchu vzorku a dosažení požadované rovinnosti pro leštění. Při jemném broušení (zrnitost 600 a hrubší) se vzorek brousil stále na jemnějších papírech (240, 400, 600) s použitím vody, která slouží jednak jako lubrikant a jednak k odplavení zbytků po broušení. Po jemném broušení zůstala na vzorku soustava jednosměrných rysek.

Při leštění byla použita diamantová pasta nejdříve o zrnitosti 3 μm , poté o zrnitosti 1 μm .

V celém procesu broušení a leštění bylo nutno čištění mezi opracováním jednotlivými zrnitostmi.

Leptání – provádí se pro zvýraznění mikrostruktury. Po vyleštění proto byly vzorky naleptány roztokem $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_4$, kdy byly ponořeny do roztoku až do dosažení požadovaného kontrastu, poté opláchnuty vodou a osušeny. Mikrostruktura všeobecně poskytuje informace o rozdílech ve struktuře, tj. ve velikosti zrna, toku vláken, struktuře, dendritech atd., o rozdílech v chemickém složení projevujících se segregacemi, karbidickou a feritickou řádkovitostí, dendritickým odměšováním, vměstky a hloubkou nauhličení nebo oduhličení. Rovněž zviditelňují necelistvosti jako podélné trhlinky, přeložky, porositu, vločky, pavoučkovité trhliny, křehké trhliny atd. [7].

Po naleptání jsou již vzorky připravené na hodnocení pod mikroskopem – obr. 25.



Obr. 25 Vzorky připravené na hodnocení

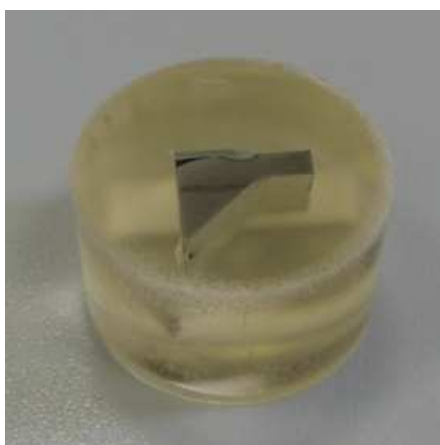
Výsledky metalografické kontroly

Svařované vzorky se hodnotily na hloubku závaru, promíchání přídatného a základního materiálu, zachycené strusky, porozity, trhlin ve svarovém kovu a v teplem ovlivněných pásem. Vzorky byly hodnoceny na mikroskopu Olympus U-CMAD3 – obr. 26.



Obr. 26 Mikroskop Olympus U-CMAD3

Na obr. 27 je vidět detail vzorku, který se vrchní stranou pokládá dolů na plochu mikroskopu. V počítači je potom struktura vzorku viditelná při nastaveném zvětšení 50x – obr. 28.



Obr. 27 Detail vzorku



Obr. 28 Struktura vzorku v počítači

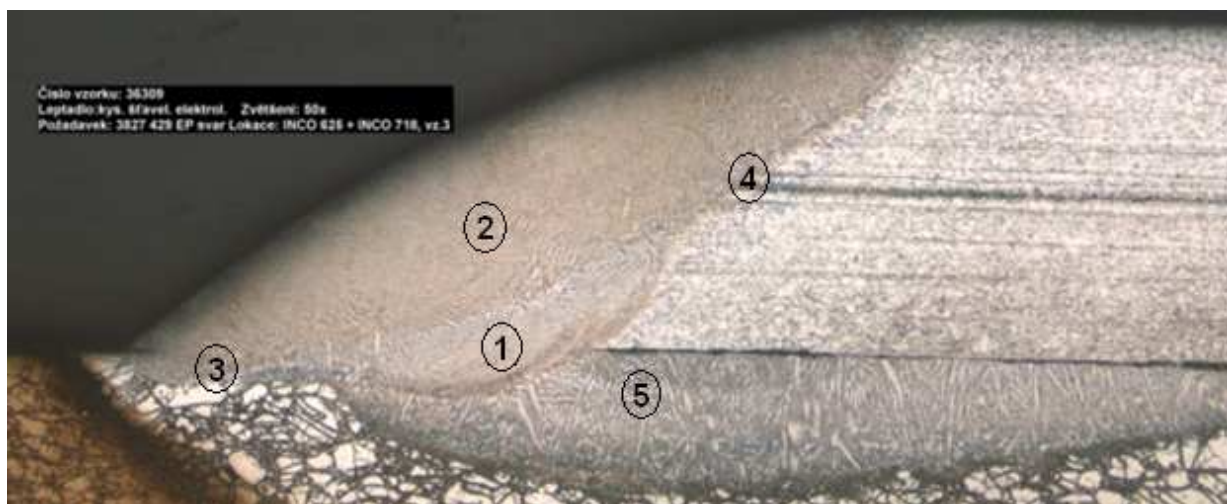
Samotné hodnocení makrostruktury vzorků – obr. 29, 30, 31 probíhalo při 50 - ti násobném zvětšení a z hodnocení vyplývá, že na žádném ze vzorků nebyly objeveny nedovolené defekty, což svědčí o kvalitě provedeného svarového spoje. Svary na všech vzorcích odpovídají požadavkům normy AMS2680 pro svařování těchto dílů. Svar byl vyhodnocen jako **VYHOVUJÍCÍ** – viz příloha 1.



Obr. 29 Vzorek 36289 – zvětšeno 50x

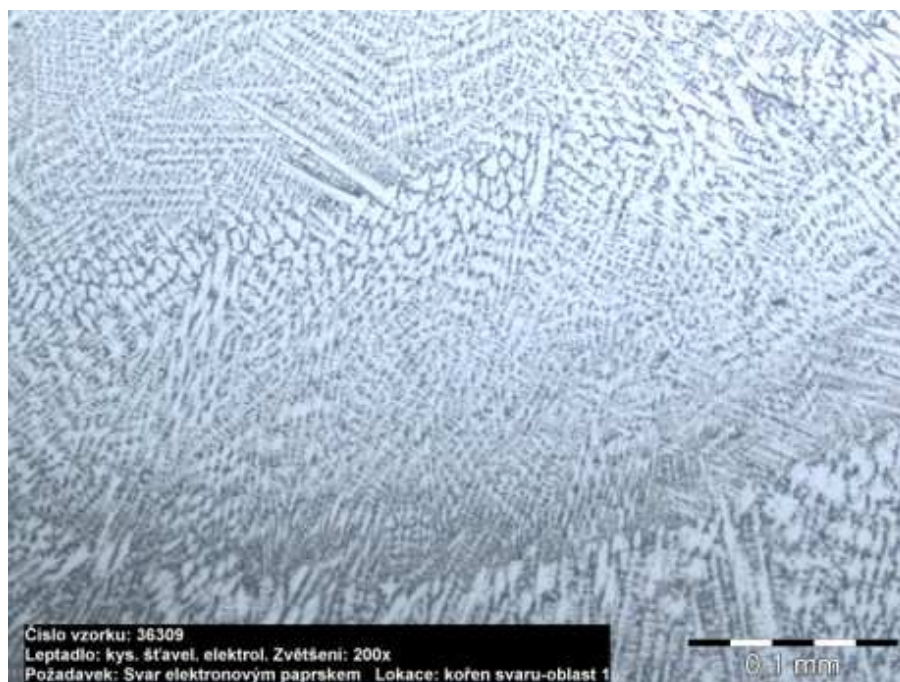


Obr. 30 Vzorek 36299 – zvětšeno 50x

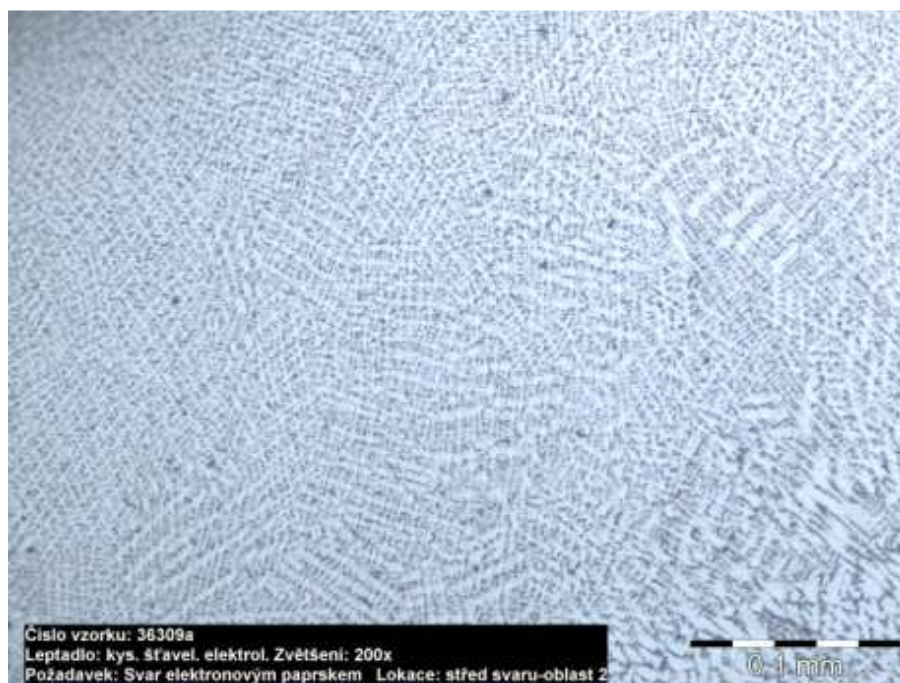


Obr. 31 Vzorek 36309 – zvětšeno 50x. Označení oblastí: 1 – kořen sváru, 2 – střed svaru, 3 – TOO mezi svarem a materiálem Inconel 625, 4 - TOO mezi svarem a materiálem Inconel 718, 5 – oblast předchozího TIG svaru

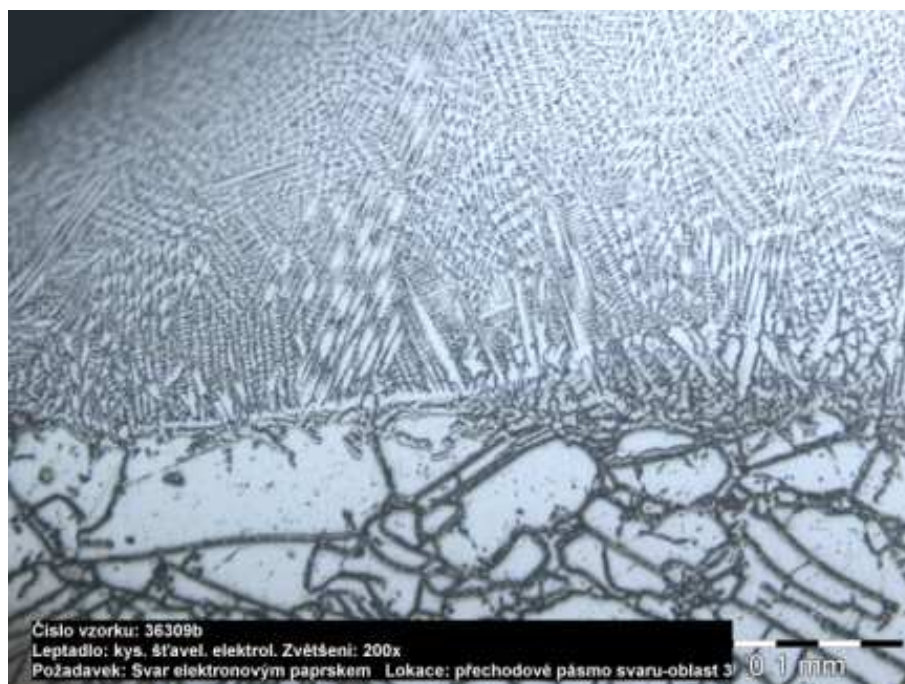
Po vyhodnocení mikrostruktury při zvětšení 50x bylo provedeno i hodnocení mikrostruktury při zvětšení 200x vzorku 36309 pro lepší popis a vyhodnocení struktury středu svaru – obr. 32, kořene svaru – obr. 33, přechodových oblastí – obr. 34 a 35 i oblasti předchozího TIG svaru – obr. 36.



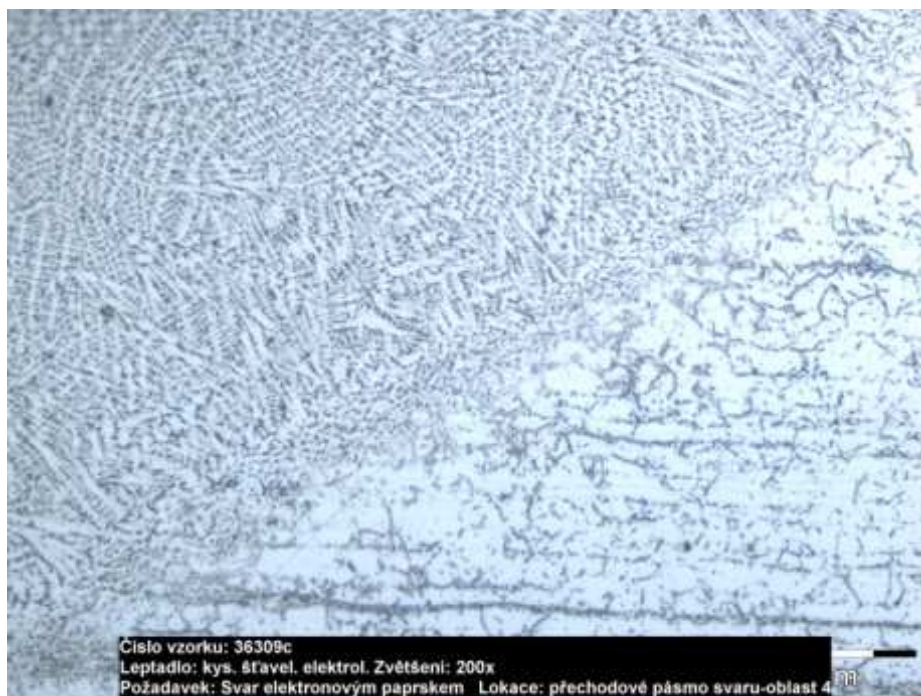
Obr. 32 Kořen svaru – zvětšení 200x. Je tvořen mírně zhrubými svarovými dendrity v austenitické matici (svar probíhá v kořeni přes hrubé TIG svarové dendrity). Struktura obsahuje velmi jemné precipitáty fáze γ' .



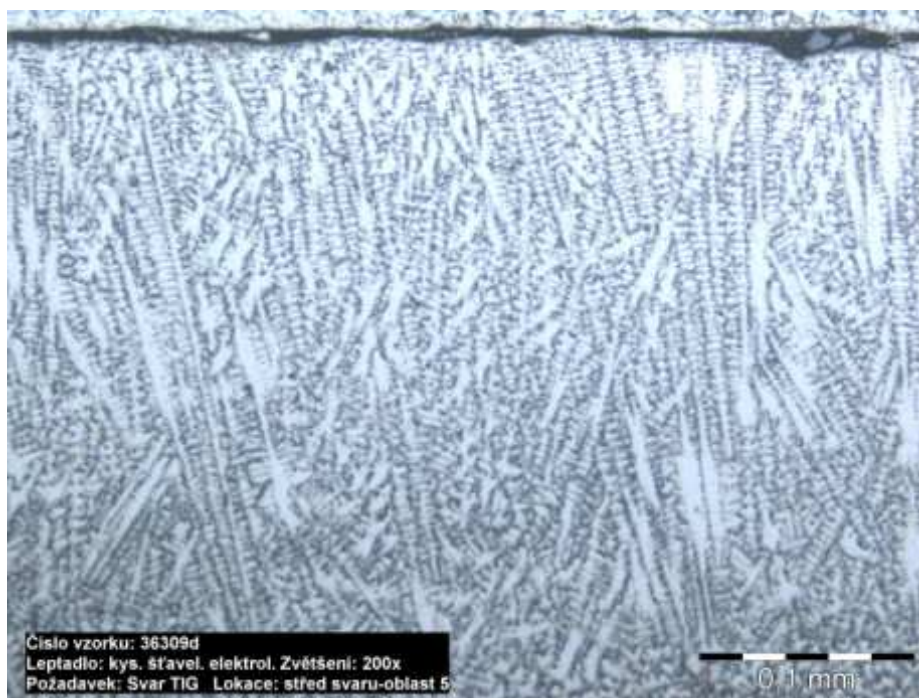
Obr. 33 Střed svaru – zvětšeno 200x. Je tvořen jemnými svarovými dendrity. Struktura obsahuje velmi jemné precipitáty fáze γ' .



Obr. 34 TOO mezi svarem a materiálem Inconel 625 – zvětšeno 200x. Svar se prolíná s materiálem Inconel 625 (dole), který má hrubší zrna v austenitické matici, na jejichž hranicích jsou vyloučeny karbidy.



Obr. 35 TOO mezi svarem a materiálem Inconel 718 – zvětšeno 200x. Svar se prolíná s materiálem Inconel 718 (napravo), který obsahuje velmi jemné precipitáty fáze γ' . Struktura je karbidická v austenitické matici.



Obr. 36 TOO v materiálu Inconel 625 – zvětšeno 200x. Hrubé svarové dendrity byly způsobené předchozím svařováním metodou 141.

Hodnocení svaru

Svarový spoj byl na základě výše uvedených zkoušek vyhodnocen jako **vyhovující**. Na základě vyhovujícího hodnocení svarového spoje došlo k certifikaci svaru a byl změněn technologický postup na svařování metodou 511, na základě něhož se dílec opravuje.

4 ZHODNOCENÍ POUŽITÝCH METOD SVAŘOVÁNÍ Z HLEDISKA DEFORMACÍ DÍLCE LETECKÉHO MOTORU

Po technické stránce je metoda svařování svazkem elektronů šetrnější ke svařovaným materiálům než metoda TIG. Jestliže metodou TIG vznikaly deformace až 0,7 mm na průměru a 0,3 mm na ploše housingu, tak při svařování elektronovým paprskem jsou deformace řádově nižší, tj. do 0,1 mm na průměru a 0,05 mm na ploše. Je to způsobeno menším vneseným teplem do materiálu při svařování. Tyto minimální deformace znamenají delší životnost dílce, jelikož není nutná následná oprava těchto ploch, nehledě k zeslabení základního materiálu dílce. Rovněž nedochází k následnému rovnání dílce, při kterém v dílci vzniká pnutí a je další možnost poškození dílce. Další nemalou výhodou je rovněž automatické svařování elektronovým paprskem, kde je na minimum snížena možnost chyby operátora, dále je zajištěna opakovatelnost svařování a také estetická stránka svarového spoje provedeného svazkem elektronů. Při tomto způsobu svařování je nutné brát na zřetel velikost deformací způsobenou předchozí opravou, která může být větší než jsou předepsané limity a proto nelze vyloučit následnou další opravu.

Ekonomické hodnocení

- TAT – jeden z nejsledovanějších ukazatelů oprav dílců ze strany zákazníků. Závisí na něm doba opravy celých motorů potažmo letadel. Díky změně technologie svařování došlo k jejímu snížení doby opravy o 2,8 dne - tab. 2, Gate 2, jelikož již není nutné opravovat deformovaný dílec po svařování.

Tab. 2 Průměrná doba opravy dílce před a po změně technologie svařováním

PN	Období	Průměr z Gate 1	Průměr z Gate 2	Průměr z Gate 3	Průměr z Total Gate
3827429-1	Do 31.12.2009	2,5	11,3	0,5	14,4
	Po 01.01.2010	1,1	8,5	0,4	10,0

- Náklady na opravu – vzhledem k tomu, že po svařování TIG se vždy musela deformovaná část dílce opravit, tak proces opravy obsahoval více operací – tab. 3. Po

změně technologie svařování se vynechávají operace pro opravu deformací, jelikož je již není nutné provádět – tab. 4. Rozdíl v nákladech na opravu dílce při svařování TIG a EBW činí 4.260 Kč/dílec.

Tab. 3 Proces opravy při TIG svařování

400	Odsoustružení "baffle ring" - Turning	25	MIN
575	Alkalické odmaštění - Degreasing	1	MIN
600	Kapilární kontrola - FPI	0,1	MIN
650	RP sestavení nového "baffle ring" - HF	10	MIN
800	Stehování nového "baffle ring" - Welding	20	MIN
850	Přivaření nového "baffle ring" - Welding	50	MIN
1050	Alkalické odmaštění - Degreasing	1	MIN
1100	Kapilární kontrola - FPI	0,1	MIN
1500	Obrábění -D- před MS - Machining	38	MIN
1550	Obrábění DIA H před MS - Machining	28	MIN
1600	Alkalické odmaštění - Degreasing	1	MIN
1650	Kapilární kontrola - FPI	1	MIN
1800	Tryskání DIA H a -D- před MS - Blasting	44	MIN
2000	Obrábění plochy -D- po MS - Mach	60	MIN
2050	Obrábění DIA H po MS - Machining	60	MIN
2100	RP začištění po MS - HF	25	MIN

Tab. 4 Proces opravy při svařování svazkem elektronů

400	Odsoustružení "baffle ring" - Turning	25	MIN
575	Alkalické odmaštění - Degreasing	1	MIN
600	Kapilární kontrola - FPI	0,1	MIN
650	RP sestavení nového "baffle ring" - HF	10	MIN
875	Svařování EP- "baffle ring" - Welding	40	MIN
1000	RP začištění svaru nového "baffle ring"	20	MIN
1050	Alkalické odmaštění - Degreasing	1	MIN
1100	Kapilární kontrola - FPI	0,1	MIN

ZÁVĚR

Základem pro zpracování této bakalářské práce byl požadavek firmy Honeywell na snížení deformací při svařování dílce 3827429-1.

V teoretické části práce bylo provedeno nastudování opravárenské dokumentace, svařovaných materiálů, svařovacích metod a výběr metody svařování, při které vzniká minimum deformací a je dostupná ve firmě Honeywell.

Na základě svařených vzorků a vyhovujících výsledků požadovaných kontrol svarových spojů byla změněna metoda svařování dílce z metody 141 na metodu 511, která přinesla nespornou výhodu v minimalizaci deformací v důsledku svařování a v závislosti na tom také snížení průběžné doby opravy dílce při velkém snížení nákladů na opravu a prodloužení životnosti dílce, které ocení zvláště zákazník.

Výsledek bakalářské práce lze shrnout následovně:

- změnou metody svařování z TIG (141) na EBW (511) došlo k výraznému snížení deformace dílce při procesu svařování
- zvýšila se životnost dílce => spokojenost zákazníka (nemusí investovat do koupe nového dílce)
- snížení průměrné doby opravy dílce o 2,8 dne
- náklady na opravu se snížily o 15%
- byla nutná investice do přípravku na svařování elektronovým paprskem, cca 89.000 Kč, návratnost této investice 5 měsíců
- celkové úspory na opravu dílce za rok činí 221.520 Kč při plánu opravy 52ks/rok

Změna technologie svařování byla samozřejmě možná také proto, že firma Honeywell disponuje zařízením pro svařování elektronovým paprskem, která je z hlediska pořízení vlastního zařízení velice nákladná. Toto zařízení je používáno i pro svařování jiných dílců do leteckých motorů, kde jí nelze nahradit jinou metodou svařování.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

1. KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986
2. TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvárania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
3. PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 350s. ISBN 80-7204-130-4.
4. AMS 2680C. *Electron-Beam Welding For Fatigue Critical Applications*. Warrendale: SAE International, APR 2006
5. KOLEKTIV AUTORŮ. *Progresivní materiály a nové směry ve svařování*. (Sborník přednášek). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Ediční středisko, 1999, ISBN 80-7078-701-5
6. ASM HANDBOOK COMMITTEE. *Metallography and Microstructures*. 2000, 669s, ISBN 0-87170-007-7
7. Honeywell. *Interní předpisy MET 002, 003, 004, 005, 021, 034*.
8. Honeywell. *Firemní literatura*.
9. <http://www.svarbazar.cz>
10. SEIDLER, M. *Diplomová práce*, VUT-FS Brno, 1989

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Certifikát postupu svařování EBW

Přílohy